

TSUKIMI

資料2-4

Lunar Terahertz Surveyor for Kilometer-scale Mapping



テラヘルツ波を用いた 月面の広域な水エネルギー資源探査

第32回衛星小委員会 資料

2025年6月30日(月) 16:00~18:30

笠井康子（情報通信研究機構・研究統括）、宮本 英昭（東京大学大学院・工学系研究科システム創成学専攻・教授）、鷺 和俊（情報通信研究機構・テラヘルツ連携研究室・研究員）、本多哲也（SpaceBD・CTO）、前澤 裕之（大阪公立大学大学院・理学研究科物理学専攻・准教授）

- 1 背景
- 2 研究開発の目的
- 3 研究開発の成果
- 4 今後の展開

人類活動は月・火星に拡大しようとしている

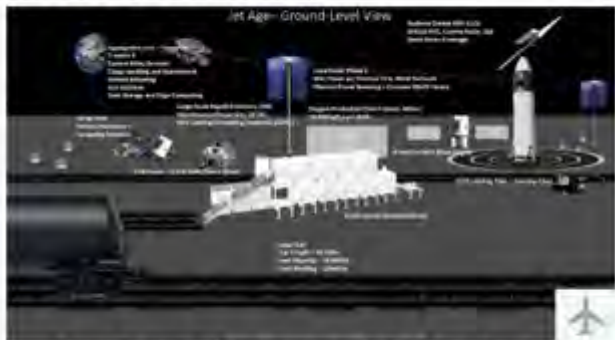
○ アメリカは、NASAを主体としたアルテミス計画、Moon to Mars(M2M)などの月面・火星探査計画や、DARPAを主体としたLunA-10を通じて、国際協調と産業振興を進め、持続可能な月探査を目指している。

○ 中国のILRSと嫦娥計画は、月面基地建設やサンプルリターンを目指し、2030年代に月の南極に基地を建設予定。また、欧州のExplore2040は月と火星探査を推進、持続可能な宇宙探査を目指している。

○ 日本は、アルテミス計画への参加やJAXAによる技術開発のほか、日本版SBIR、スターダストプログラム、宇宙戦略基金などを通じて、スタートアップや非宇宙企業を含む我が国の月面産業に取り組む民間企業を支援している。



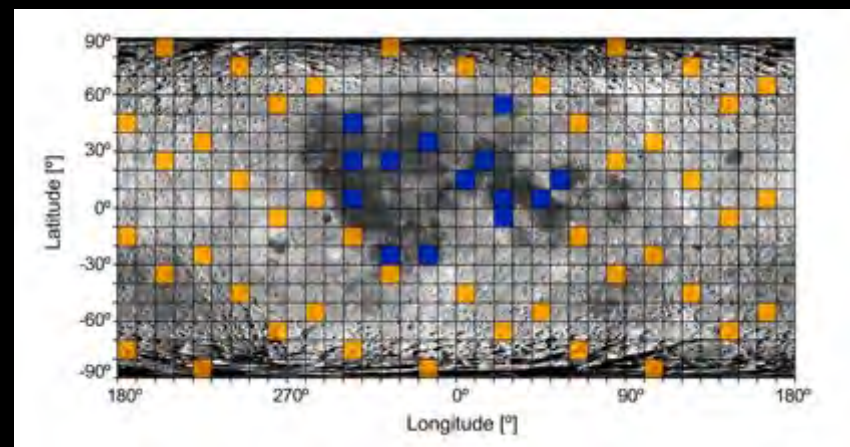
※ISRU (in situ resource utilization : 現地で入手可能な資源を利用)



LunA-10/Jet Age (2035~) の月面活動イメージ (出典 : DARPA)



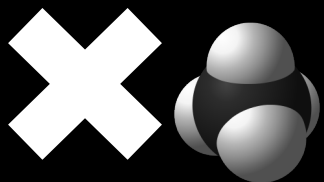
かぐや探査機では多様な緯度と時刻で月の影領域における水氷を検出 (オレンジと青はそれぞれ主に高地と海) 出典 : <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.119065>



SX 研究開発拠点 (宇宙戦略基金・第一期文部科学省計上分) 採択案件
 ・月面開発のための宇宙資源開発拠点 (東京大学 宮本英昭)
 ・月面探査・利用を産業化するための宇宙機器開発・人材育成拠点 (立命館 佐伯和人)

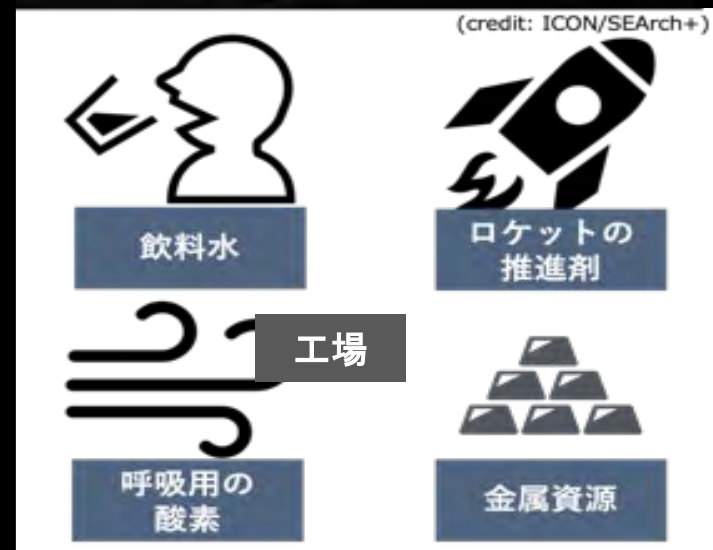
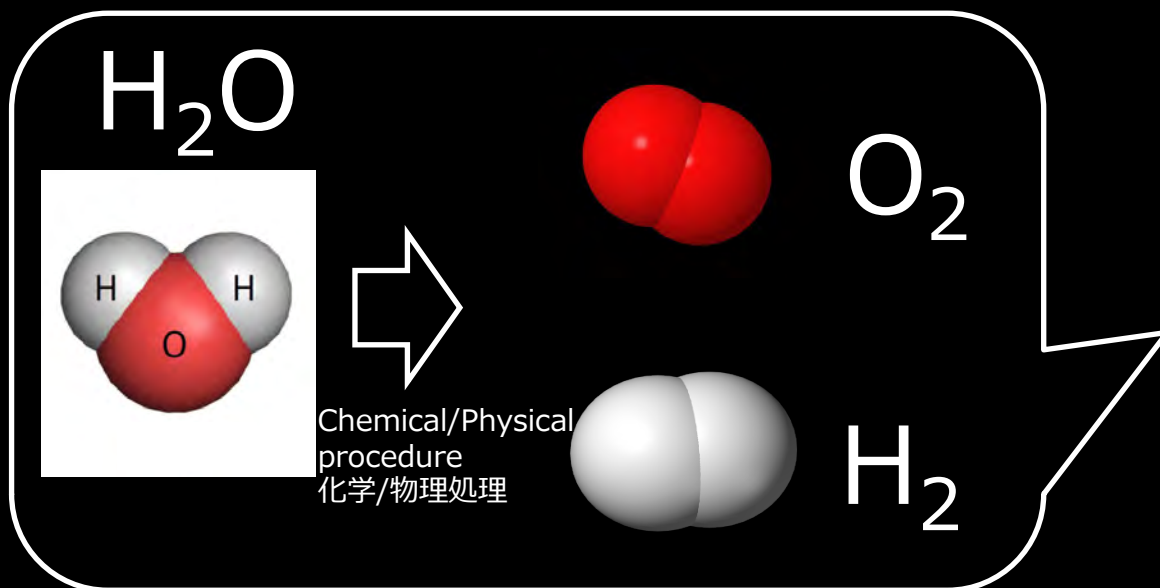
人類の月面活動にはエネルギーが必要

月で活動する際の基盤インフラエネルギー源は？



地球で使用している石油やメタンガスは
月には存在しない

○
Water 水 H_2O



水エネルギー資源はどこから調達？

100人程度の月面都市を支えるための

- ・水関連エネルギー消費量： 約130 GWh/年 (≒1.3 GWh/人/年)
- ・そのために必要な水量： **約10,000トン/年**

Jeffrey S. Lee et al., 2024

持続的に月面を開発するには水エネルギーは現地調達 (ISRU)が現実的

地球から輸送

約80兆円/年
月面都市人口100万人と仮定

約10,000倍のコスト差

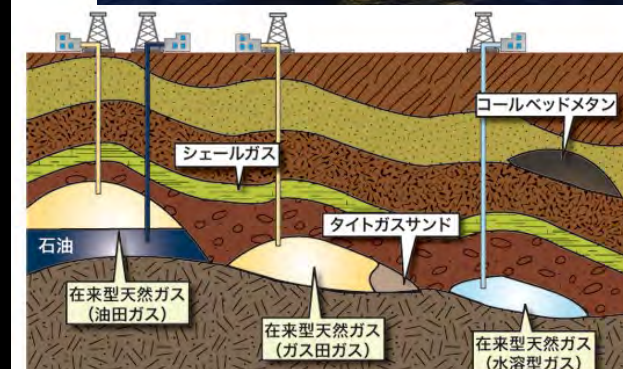
月産月消(ISRU)

約100億円/年※
月面都市人口100万人と仮定

※酸素水素の作り方に強く依存

地球では資源は当たりをつけてから掘る
月でも当たりをつけて水を掘るべき

天然ガスの採掘の様子

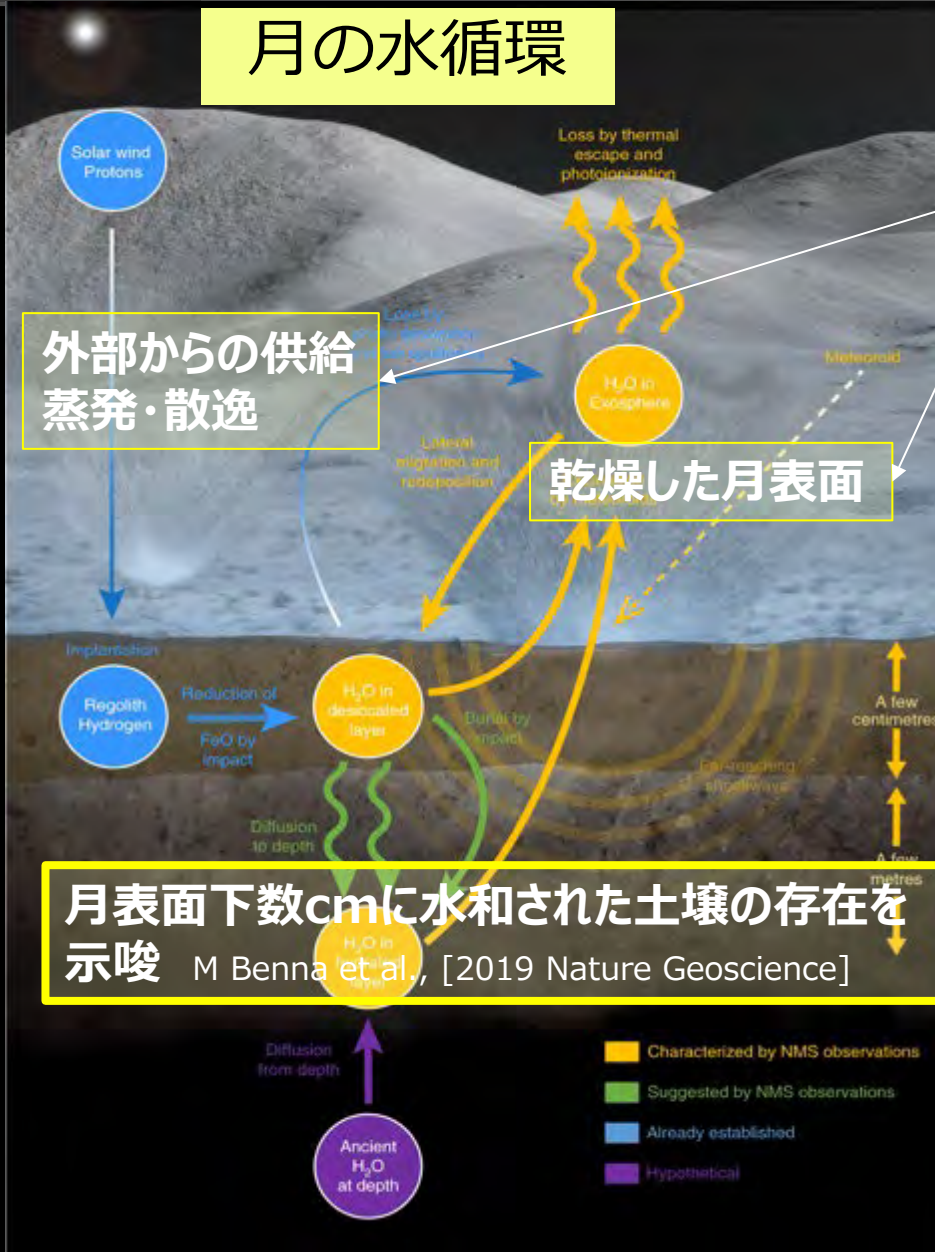


https://spc.ist.ao.jp/news/150702/topic_2_02.htm

https://eco-word.jp/html/04_energy/en-23.html

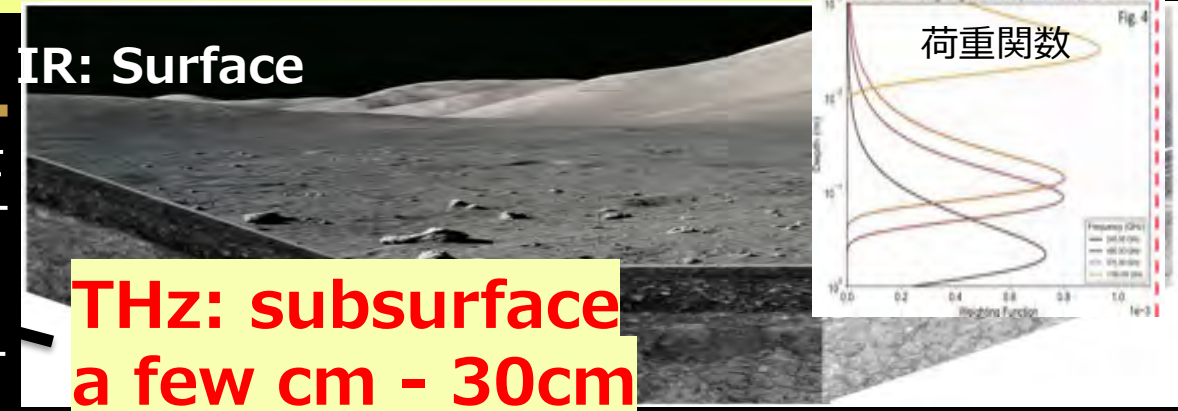
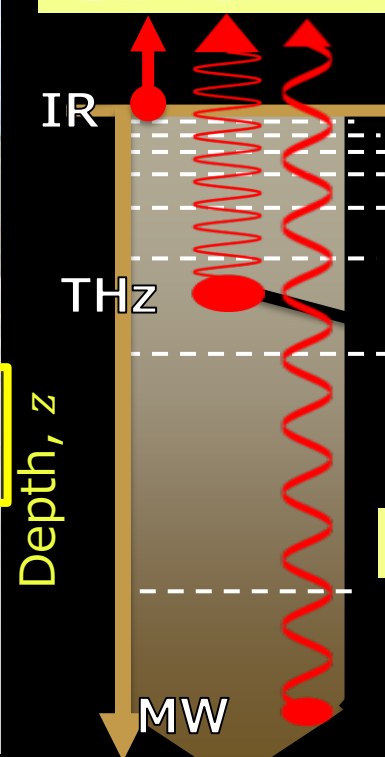
月表面は乾燥。表面における水資源はごくわずか

月の水循環



クラビウスクレーターで確認された水は土壌1gあたり**100 から 5400 μg**、これはサハラ砂漠の土壌に含まれる水分量の**1/100に相当** [C. I. Honniball Nature Astronomy 2021]
 アポロのサンプル（ガラス）から、**数十PPM(10⁻⁶)の水**を発見 [Saal et al 2008]

最大級量*の水氷はどこにあるのか？



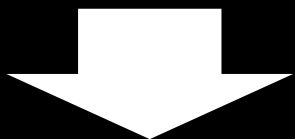
**THz: subsurface
a few cm - 30cm**

240GHz, 480GHzのテラヘルツ波を選定

**Microwave: deep layers from surface
(0.5~6 m)**

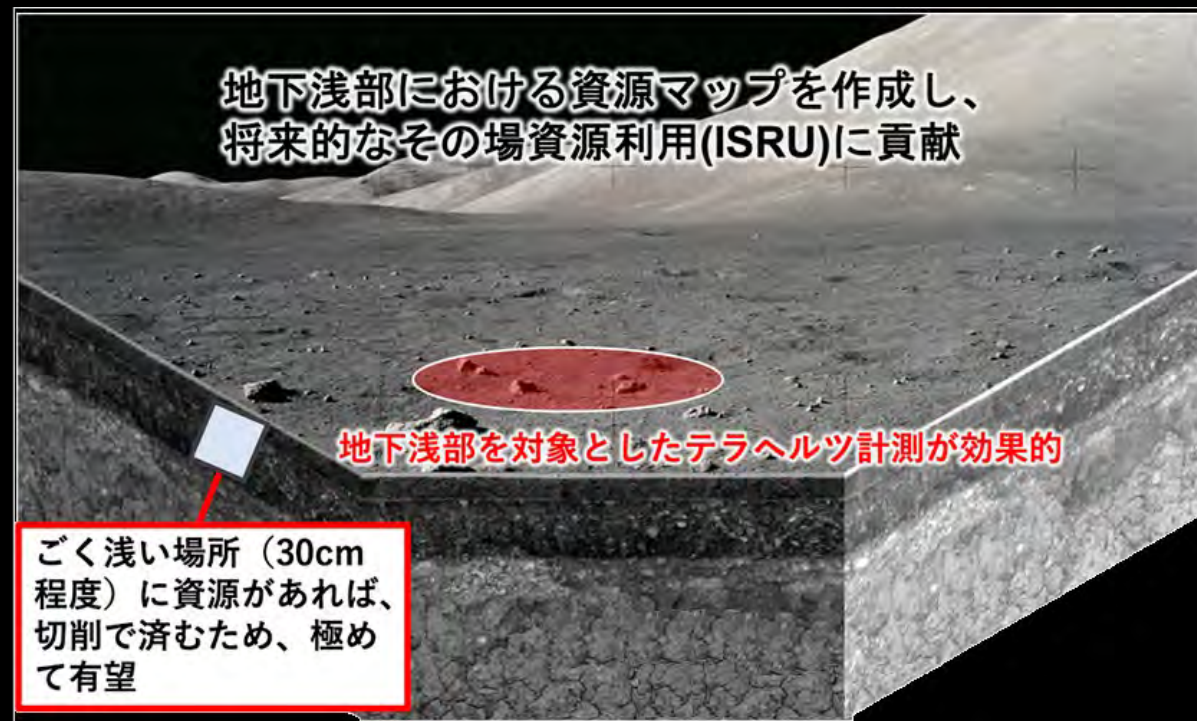
テラヘルツ波リモートセンシング技術による月地表面探査

- あらゆる物質は、その物質の温度に応じたエネルギーを放射。
- テラヘルツ波のパッシブセンサ（電波を発信せず、受信のみ可能なセンサ）を用いることで、月の地表面やサブサーフェスからの放射輝度温度（物体が黒体であると仮定した場合の温度）を測定。



- 校正した輝度温度から、データ解析アルゴリズム等を用い当該場所の物質の誘電率を推定。観測場所の地理情報や、水を含む各物質のデータベース等の月シミュレータの総合的な情報を利用することで精度の高い資源探査を実現。

月地下深部は掘削が困難であるため、比較的掘削が容易な地下浅部の探査が可能なテラヘルツ計測が有効



テラヘルツ波リモートセンシング技術の進展

- 現在、軌道上に地球観測衛星は約800機あるが、電波と光の中間という電磁波の技術的な困難さから、地球衛星観測50年の歴史の中でテラヘルツ波観測が可能なのは6機のみ（日本1、欧州1、米国3）。惑星探査衛星ではテラヘルツ波観測が可能なのは2機のみ（欧州2、我々の参加は1）。
- **我が国は、CFRP※主鏡などセンサ開発やデータ処理において独自技術を保有**

※炭素繊維強化プラスチック



- 1 背景
- 2 研究開発の目的
- 3 研究開発の成果
- 4 今後の展開

研究開発の目的

○政策目標（アウトカム目標）

国際的に進められている月の開発利用に関し、我が国がICT分野において戦略的かつ優位に推進していくため、テラヘルツ波を利用した月面の水資源探査技術確立し、広域な水資源探査サーベイを実現することで、月での宇宙科学・探査や経済活動などの持続的な活動へ貢献する。

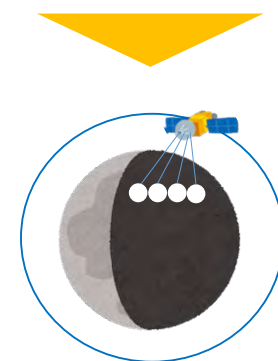
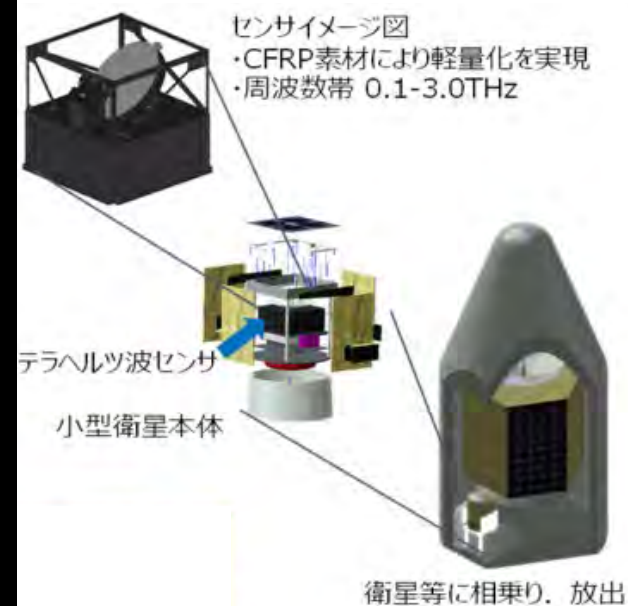
また、これらにより、将来的な地球規模の激甚災害把握のための水蒸気観測や、惑星における詳細な宇宙資源探査サーベイ及びテラヘルツ大容量通信の宇宙利用の促進に寄与する。

○研究開発目標（アウトプット目標）

月表面を構成する物質の物性推定に必要な月面テラヘルツ波物性データベース、及び観測データからの物性を推定することを可能にする月面における散乱等を考慮したテラヘルツ電磁波伝搬モデルを含む解析アルゴリズムを開発し、月面の輝度温度分布を高精度（テラヘルツ波センサのシステム雑音温度5000K以下）に観測し、月面の水・氷含有量の推定分布の取得を可能とする多チャンネルテラヘルツ波センサを開発する。月周回軌道上での効率的な探査を実現するために必要な衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術を開発する。超小型衛星に搭載可能な小型軽量なセンサ部とデータ処理部は合わせて10kg程度以下とする。

また、これらの技術を統合し、宇宙での運用が可能なシステムを開発することで、高い空間分解能（10km以下）かつ広域サーベイにより月面の水循環の実態を把握し、効率の良い資源獲得の指針が得られることを検証する。

テラヘルツリモートセンシングの構成要素（概要）



研究開発の目標（技術課題）

○ 技術課題

ア) 小型軽量な多チャンネルテラヘルツ波センサ開発

テラヘルツセンシングによる月面水資源探査の効率的な実施のため、月面構成物のテラヘルツ波物性データベースの作成及び解析アルゴリズムの開発、月資源探査に最適な多チャンネルテラヘルツ波センサを開発する。

a) 月面テラヘルツ波物性データベースの構築

テラヘルツ波測定で得られる放射輝度温度から誘電率を導出し、その誘電率から氷や鉱物などの推定を可能にするための物性測定を行う実験室実験システムを考案する。このシステムを用いた測定により月面構成物に対するテラヘルツ物性データベースを構築する。

b) 月面における散乱等を考慮したテラヘルツ電磁波伝搬モデルを含む解析アルゴリズムの開発

a)のデータベースにより、テラヘルツ放射輝度温度から、氷・水・土壌水分含有量等の月面構成物の推定を可能にする解析アルゴリズムの研究開発を行う。また、吸収・放射・地表面散乱を考慮に入れた月表面測定のためのテラヘルツ電磁波伝搬モデルの開発を行う。

c) 多チャンネルテラヘルツ波センサの開発

a)のデータベースを踏まえ、b)の電磁波伝搬モデルを用いた解析により、テラヘルツ帯における最適な周波数チャンネルの組み合わせを決定し、各周波数における月面からの放射輝度温度を高精度（システム雑音温度5000K以下）で測定可能かつ小型軽量で複数周波数の観測が可能なセンサを開発する。

イ) 軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術

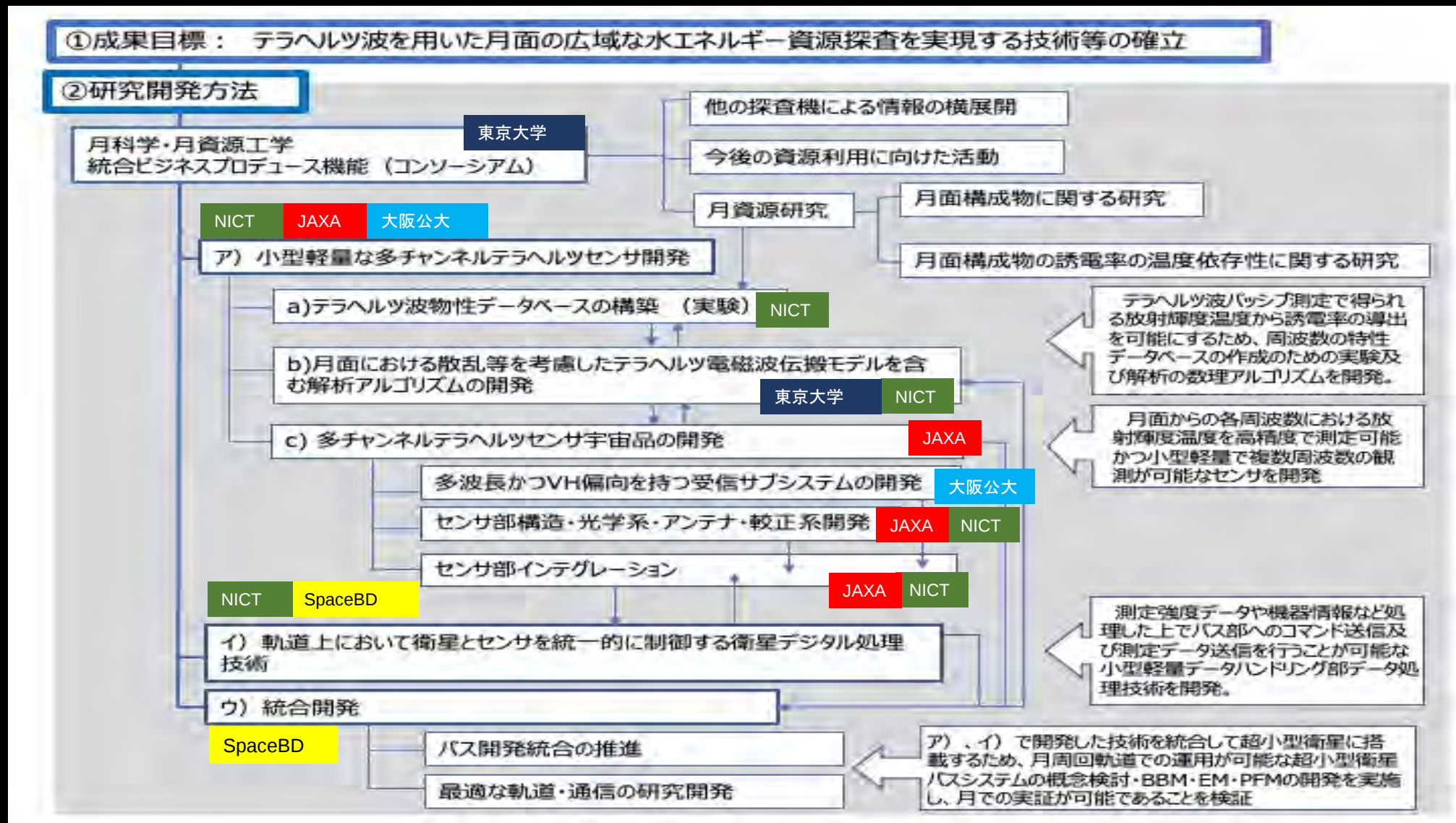
月周回軌道では、地球周回軌道のように高頻度での通信が困難であることから、測定強度データ及び測定条件などの情報をデータハンドリング部に一時保存し、軌道上においてア) b) で開発した解析アルゴリズム等を利用したデータ処理等を実施し、それに準じたバス部へのコマンド送信及び測定データ送信を行える小型軽量なデータハンドリング部のデジタル処理技術を開発する。

ウ) 統合開発

ア)、イ) で開発した技術を統合して超小型衛星に搭載するため、月周回軌道での運用が可能な超小型衛星バスシステムの概念検討・ブレッドボードモデル（BBM）・エンジニアリングモデル（EM）・プロトフライトモデル（PFM）の開発を実施し、月での長期間実証が可能であることを検証する。

研究開発実施体制

実施研究機関：情報通信研究機構、大阪公立大学、宇宙航空研究開発機構、Space BD（株）、東京大学



研究開発スケジュール

	FY	2021		2022		2023		2024	
	マイルストーン			▲ MDR ミッション定義審査		▲ PDR 基本設計審査		▲ コンポーネント CDR 詳細設計審査	▲ CDR
開発/打上	衛星インテグレーション	初期検討					EM開発・システム試験		
	衛星バス部開発			BBM開発		EM開発・試験			
	センサ部開発	初期検討		BBM開発		EM開発・試験			
運用/データ処理 /研究/検討	地上データ処理系	初期検討		模擬土壌を用いた実験室実験による 検証 データベース検討					
	アルゴリズム 研究開発								

- 1 背景
- 2 研究開発の目的
- 3 研究開発の成果
- 4 今後の展開

ア) 小型軽量な多チャンネルテラヘルツ波センサ開発

a) 月面テラヘルツ波物性データベースの構築

- 月面模擬土壌に対して初めてとなるテラヘルツ波における誘電率を測定し、**テラヘルツ波物性データベース**を構築

b) 月面における散乱等を考慮したテラヘルツ電磁波伝搬モデルを含む解析アルゴリズムの開発

- **世界で初めてとなる**月面での散乱等を考慮したテラヘルツ電磁波伝搬モデルを開発。
- 当該モデルを含み、水資源獲得に優位な領域を特定できる**解析アルゴリズムを開発**

c) 多チャンネルテラヘルツ波センサの開発

- 240GHzと480GHz帯テラヘルツ波を受信し、**システム雑音温度5000K以下**で輝度温度を測定可能なEMを完成。
- 宇宙環境模擬試験および電氣的性能試験を実施し、PFM設計成立性を検証。

イ) 軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術

- 衛星軌道上デジタル処理技術を実装したオンボードコンピュータ (S-OBC) およびソフトウェアを開発

ウ) 統合開発

- 上記の技術を統合し、**目標（10km以下）より高い空間分解能（1 km以下）による月地表面のサーベイが可能であることを実証。**
- センサ部分を約10Kg程度以下を実現し、**衛星全体としても小型化・低コスト化**を実現。
 - ✓ **月周回衛星で日本初となる100kg以下級小型衛星システム**を短期間（3.5年）かつ低コスト（EM約32億円）で開発
 - ✓ 深宇宙テラヘルツリモートセンシング衛星としても、**最も小型・軽量。**

月面模擬土壌に対して初めてとなるテラヘルツ波における誘電率を測定！

月面鉱物資源探査に資する測定対象としてアポロ標準サンプルの月面表面の模擬土壌（東京大学製作：Basalt型及びAnorthosite型レゴリス）を用い、

- ・ 誘電率のかさ密度依存性 ($0.88 \sim 1.79 \text{ g/cm}^3$ で誘電率 $1.72 \sim 3.76$)
- ・ 酸化鉄・酸化チタンを多く含むIlmenite含有率依存性(0, 10, 20%で3.74, 3.83, 3.97)

の測定を実施し、月面環境を網羅する測定を達成

→それらの情報をテラヘルツ波物性データベースとして統合

→今後、さらなる水氷を含む組成比や、粒径、かさ密度を変化させた測定により、

月面の様々な領域を想定したデータベースに拡充可能

また、パッシブ実験室実験により物質のテラヘルツ波放射の放射角度毎の偏波特性を測定し、

偏波比から誘電率を導出する本ミッションの観測原理を実験室スケールで実証した。

板材(1, 3, 9 mm)
 SiO_2 , Al_2O_3



2022

鉱物片
Basalt, Dunite, Ilmenite,
Anorthosite,



2023

粒子散乱特性 (SiO_2 , Al_2O_3)
 $d=1 \sim 9 \text{ mm}$, $\phi=0.1 \sim 3 \text{ mm}$



月模擬土
Anorthosite型, Basalt型,
Ilmenite混合型



2024

表面起伏効果



温度依存
水氷

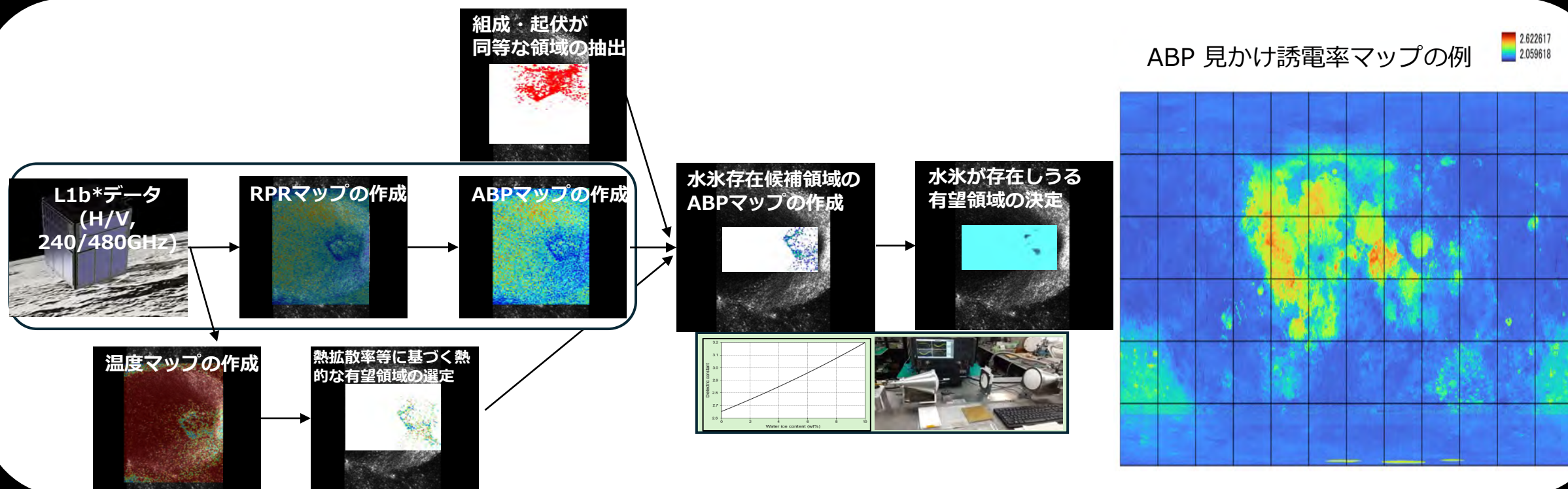


ア) b) 月面における散乱等を考慮した解析アルゴリズムの開発

月面のラフネス(凸凹)やレゴリス(砂岩石粒子層)のかさ密度などの領域により異なる地質学的背景を考慮した解析アルゴリズムの開発に際し、観測した放射輝度の偏波比 (RPR: Relative Polarization Ratio) 及びRPRと観測角から決定される本研究独自の物理パラメータとなる、**見かけ誘電率 (ABP: Apparent Bulk Permittivity) を定義。**

※100gあたり5gの目的成分が含まれている状態

レゴリス中に氷が資源利用に資する量程度 (過去の探査結果や資源工学的な観点から5wt%※程度と定めた) 含まれた場合、氷が含まれないレゴリスのABPより大きくなることから、同等の地質学的背景を持つ領域内においてABPを比較し、**高ABP領域を水資源獲得に優位な領域として特定する解析アルゴリズムを開発。**



ア) b) 月面における散乱等を考慮した解析アルゴリズムの開発

電磁波伝搬モデルの開発

$$T_b = \sum_{i=1}^n w_i T_i$$

Key parameter to extend it to THz range

$$w_i = \left(1 - e^{-k_i d_i}\right) \cdot \left(1 + R_{i(i+1)}^2 \cdot e^{-k_i d_i}\right) \cdot \prod_{j=0}^{i-1} \left(1 - R_{j(j+1)}^2\right) \cdot e^{-k_j d_j}$$

(Feng et al., 2020)

T_b : 輝度温度(放射強度)

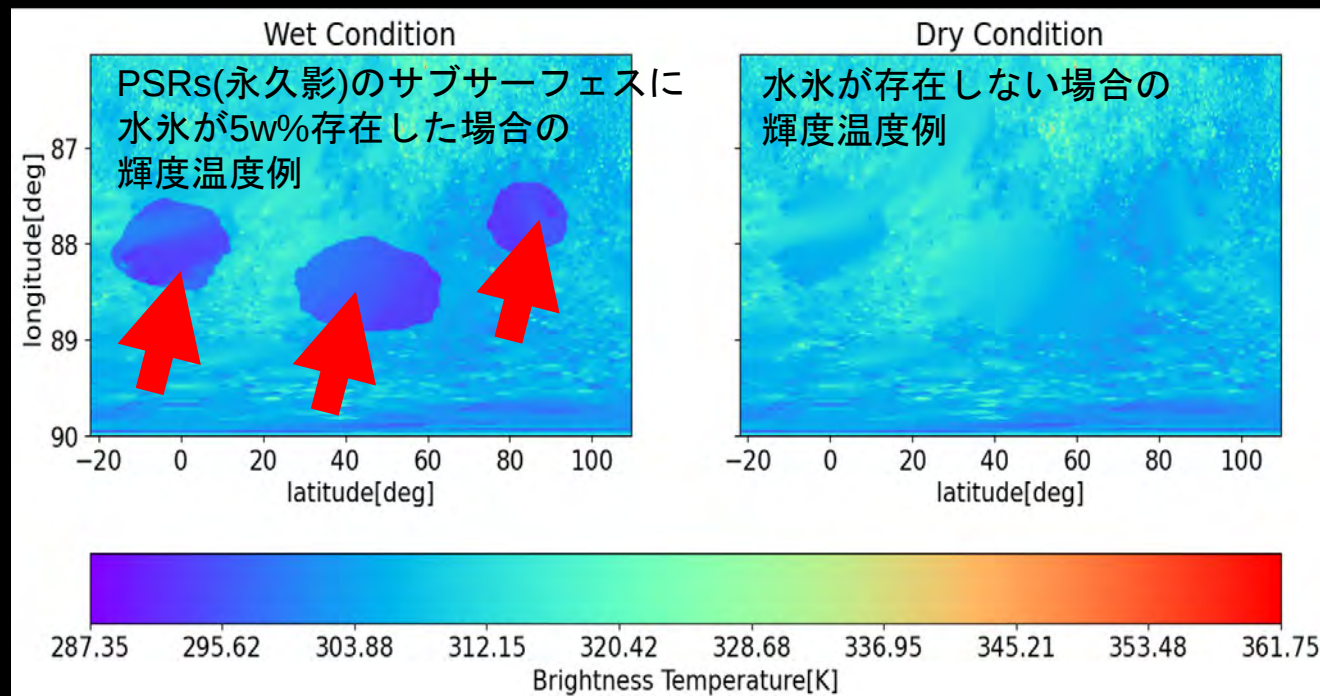
T_i : 物理温度(Hayne et al., 2017)

w_i : 重み関数

R_i : 屈折率

k_i : 吸収係数

d_i : 層厚み



開発したアルゴリズムにより計算した放射伝達計算シミュレーション例。

左：南極域のクレータの永久影領域PSRsにおいて水氷5wt%を仮定した場合
右：PSRsに水氷がない場合である。

輝度温度精度 $\sigma < 3K$ に対し、20K程度の差が見られ、有意に観測が行われる可能性を示している。

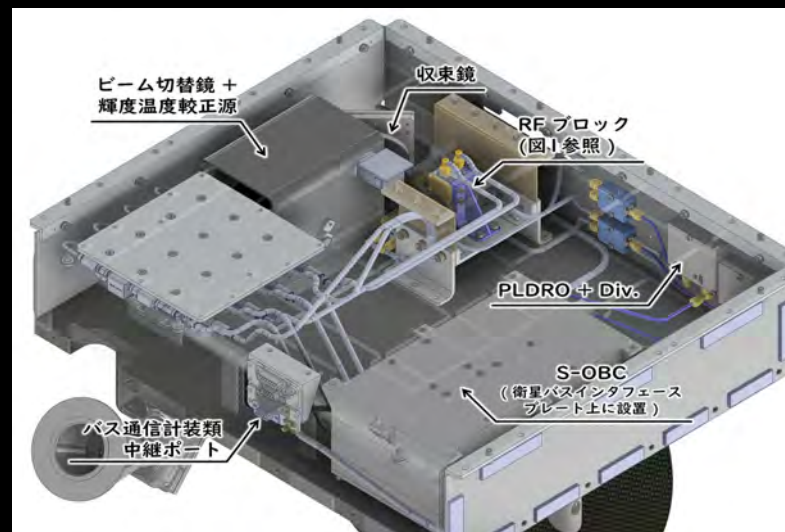
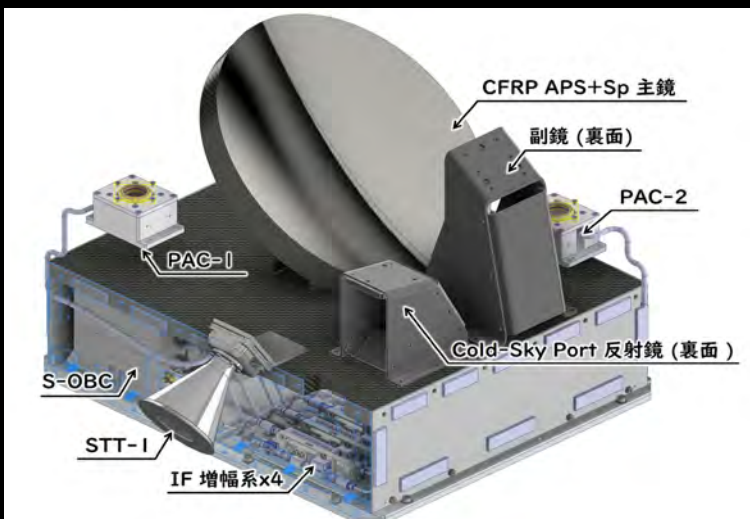
ア) c) 多チャンネルテラヘルツ波センサの開発

月面観測精度に大きく影響するCFRPアンテナ主鏡面精度について、鏡面アルミ層の溶射とショットピーニング表面処理を繰り返すことで、**表面精度の要求値 $20\text{ }\mu\text{m}$ に対し $15.6\text{ }\mu\text{m RMS}$ (精度ばらつき)の実績を達成**した。

テラヘルツ検出器の雑音温度要求値 $5,000\text{K}$ 以下に対して、上記のアンテナ光学系と結合したサブシステム雑音温度として **280GHz では約 $2,200\text{K}$ 、 490GHz 帯では $3,750\sim 4,250\text{K}$ を達成**した。これにより、輝度温度精度 $\sigma < 1\text{K}$ 程度が達成される(積分時間 0.1 sec 以下の場合)。また、観測視野分解能(アンテナFOV)は直下視の場合、 **$720\times 540\text{m}$** となり要求分解能 10km を大幅に向上し達成。

後述のセンサオンボードコンピュータ(S-OBC)を含めた構成要素を結合したセンササブシステム EM に対し、打上振動・衝撃・音響・熱真空試験などの宇宙環境模擬試験、および電気的性能試験を実施し、**PFM設計成立性を検証**した。

また、**JAXAベンチャー AWT**を設立し、**CFRPテラヘルツ波アンテナ光学系などの製品化について検討中**。



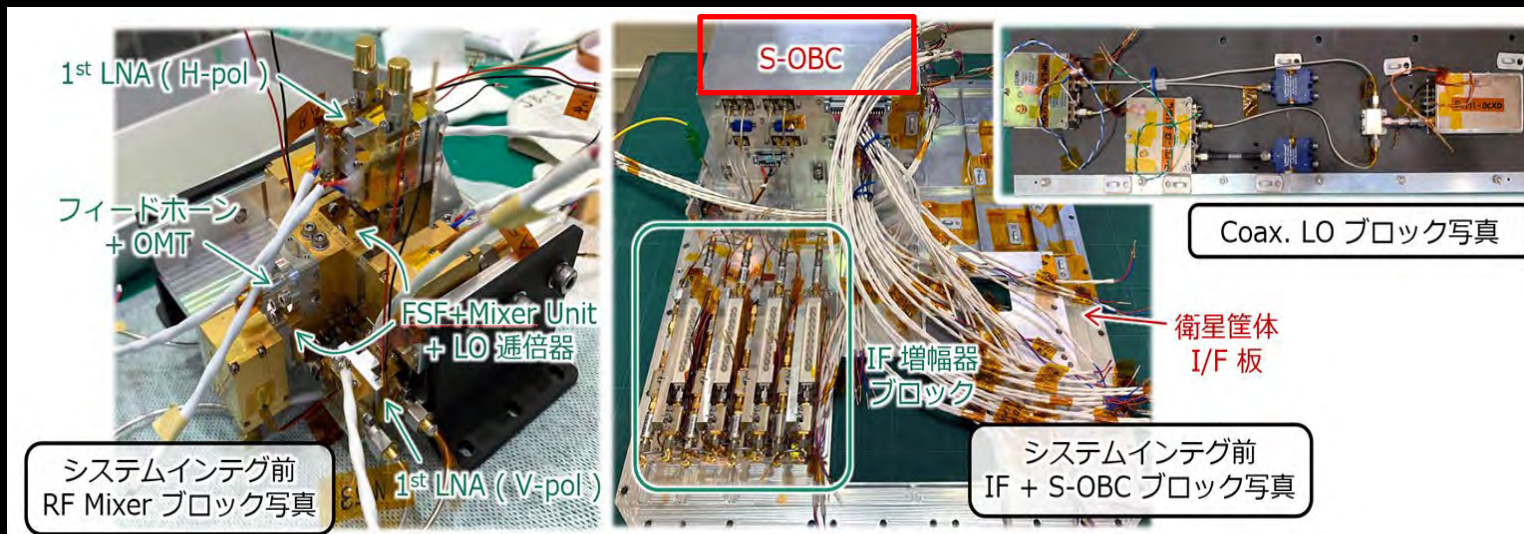
イ) 軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術

衛星軌道上デジタル処理技術を実装したオンボードコンピュータ (S-OBC) およびソフトウェアを開発

- ・ 低次から高次レベルまで状況に応じて自在に事前計画・登録しての各機器の統一的制御。
- ・ 4系統のセンサによる月面観測出力データの検出・デジタイズ。
- ・ 機器・環境情報を観測値と対応付けるデータ処理および保管、地上局ダウンリンク準備までを衛星軌道上で自律的に実行可能。

S-OBC開発に際して、月周回軌道環境における各種耐性 (温度・放射線など) を持つ部品、若しくは宇宙空間実用実績を備えている部品を選定しており、さらにコバルト60を線源とした放射線耐用試験 (10~20kRad) など実施して、**月周回軌道環境での運用が可能なデジタル処理部であることを検証。**

S-OBC EM モデルの質量は、**センサ部として要求している設計配分値 2.50 kg を下回る 2.40 kg を達成。**

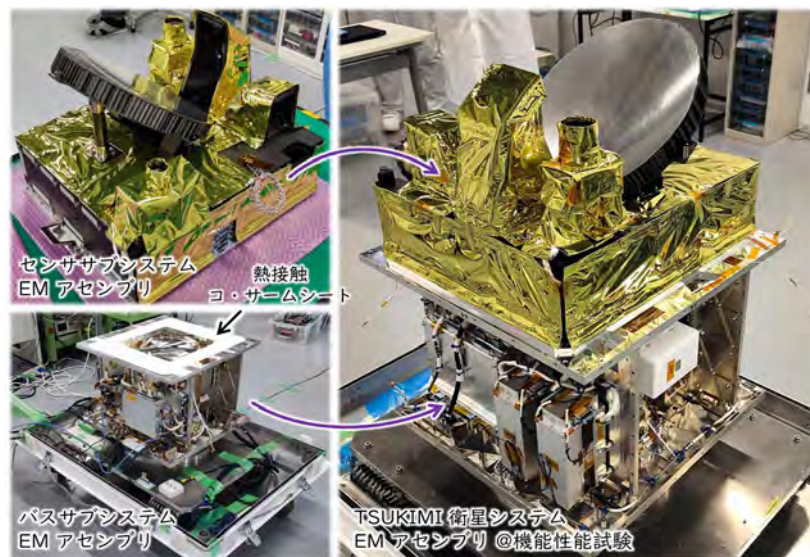
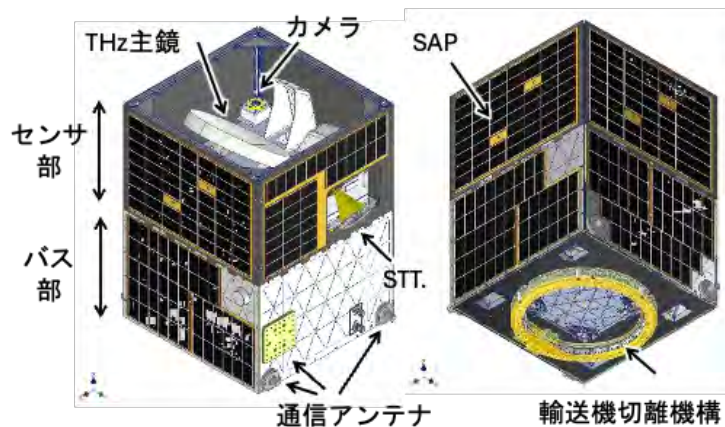


ウ) 統合開発

月周回衛星で日本初の100kg以下級小型衛星システムを短期間（3.5年）かつ低コスト（EM約32億円）で開発

- ・ エンベロープ要求：W750 × L750 × H980 mm 以下 → EM 実績値：W597 × L686 × H812 mm で大幅小型化。
- ・ 質量要求：衛星システムとして 90 kg 以下 → EM 実績値：86.1 kg で要求達成。
- ・ 消費電力要求：月面観測運用時センササブシステムに 71W 10 分以上を供給 → EM 実績値：71W 88 分相当を供給。大幅増。
- ・ 運用計画等：衛星寿命 1 年以上、一周回 2 時間、一周回あたり 30 分の月面観測、概ね一日 9 周回で観測運用を計画。

TSUKIMI衛星全体のEMを製作し、機能性能確認に加え各種環境試験（振動試験・熱真空試験・電磁両立性試験）を実施し、宇宙環境耐性を確認。



センサ/バスサブシステムアセンブリおよび電気性能試験の様子



衛星システムEM振動試験 (QT) の様子



衛星システムEM熱真空試験準備の様子

- 1 背景
- 2 研究開発の目的
- 3 研究開発の成果
- 4 今後の展開

実証試験に向けた今後の展開

- 4月、スターダスト後継のプロジェクトとして、**宇宙戦略基金（第一期・総務省計上分）の「月面の水資源探査技術（センシング技術）の開発・実証」に採択が決定。**
- テラヘルツ波を活用した水資源探査技術を活用し、これまでの技術開発成果等を統合した衛星を開発し、周回軌道・観測することにより広域での月面の水資源の実態の把握に資するデータを取得し、月面における水等の資源が所在する有望箇所の推定に繋げることを目指していく。

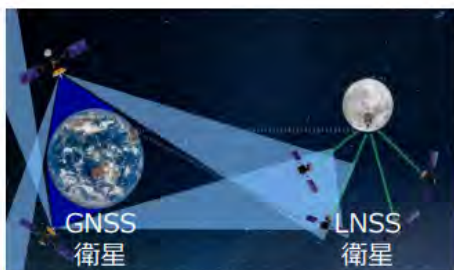
月面開発

【文】月測位システム技術（50億円程度）

- 月面・月周回軌道上で、リアルタイムに測位を行うシステムの実現に向けた技術開発

【文】再生型燃料電池システム（230億円程度）

- 月面環境での運用を想定した再生型燃料電池システムの地上実証



月測位システムイメージ ©JAXA

【文】半永久電源システムに係る要素技術（15億円程度）

- 月面環境にてメンテナンス不要かつ長期間使用可能な電源システムに係る要素技術開発

【総】月面水資源探査技術（64億円程度）

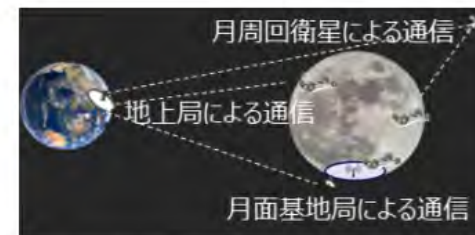
- センシングによる効率的な月面水資源探査に向けた、小型軽量なセンサを搭載した小型衛星の開発・実証



月面水資源探査のイメージ

【総】月-地球間通信システム開発・実証FS（5億円程度）

- 月-地球間における大容量かつ高精度捕捉等が可能な通信アンテナの開発に向けた基本設計、高品質・高信頼性のモバイル通信環境の実現可能性の調査



月-地球間通信システムのイメージ

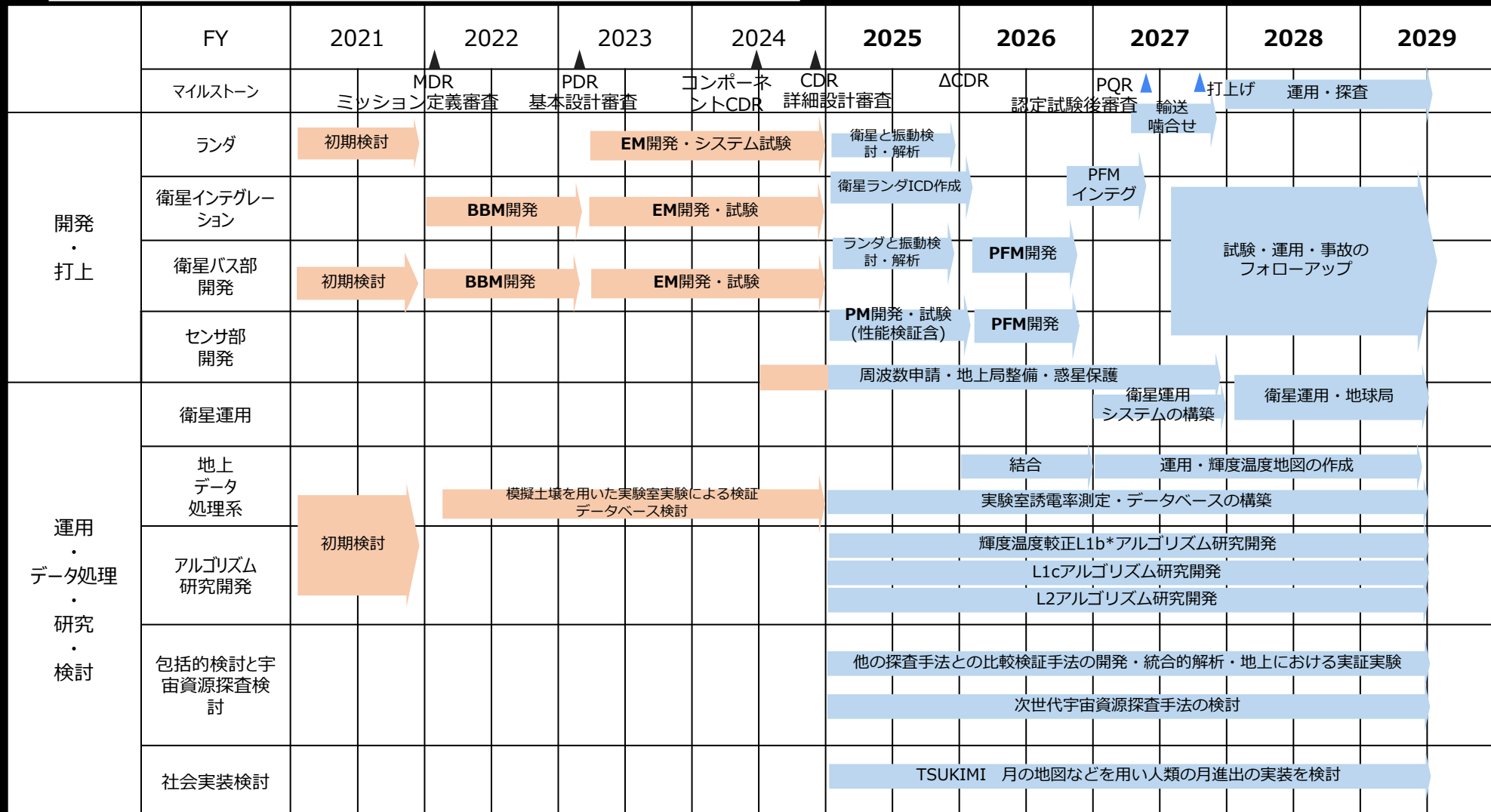
【内閣府 宇宙戦略基金Webページより抜粋】

<https://www8.cao.go.jp/space/kikin/siryou1-1-1.pdf>

今後のスケジュール

TSUKIMI衛星の実証試験スケジュールを以下に示す。

- まずは**地上試験にてセンサ性能の検証**を実施、打ち上げ後**初期チェックアウト運用にてセンサ性能の軌道上実証とアンテナ遠方界測定など必要な実証実験を行う。**
- **定常運用では、L1b*輝度温度データ検証実験とデータ解析**を繰り返し行い、アルゴリズムの精度向上を図る。



凡例

スターダスト

宇宙戦略基金

▲ マイルストーン

宇宙戦略基金の実施体制においては、ispace（衛星システム運用）、デロイト（全体プロジェクトマネジメント及びビジネス化検討）等を加えることで体制を強化